

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Matej Navijalić**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Tomislav Staroveški, dipl. ing.

Student:

Matej Navijalić

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem doc. dr. sc. Tomislavu Staroveškom na ukazanom vremenu, savjetima i pruženom prilikom za izradu ovog rada pod njegovim mentorstvom.

Zahvaljujem se tvrtki General Electric na pomoći pri izvršenju eksperimentalnog dijela ovog rada.

Matej Navijalić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student:

**Matej Navijalić**

Mat. br.: 0035190062

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**Kvaliteta obrade pri rezanju plazmom**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**Machining Quality at Plasma Cutting**

Opis zadatka:

Rezanje plazmom spada u skupinu nekonvencionalnih postupaka obrade kojim je moguće rezati električki vodljive materijale. Primjena ovog postupka vrlo je česta u pripremi materijala za daljnju obradu.

U radu je potrebno:

1. Opisati proces rezanja plazmom,
2. Navesti i objasniti parametre koji imaju značajniji utjecaj na kvalitetu reza,
3. U okviru mogućnosti upravljačkog sustava stroja za rezanje plazmom izvršiti analizu utjecaja parametara obrade na kvalitetu reza,
4. Dati zaključke rada

Zadatak zadan:

30. studenog 2017.

Rok predaje rada:

1. rok: 23. veljače 2018.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.
3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.
3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Tomislav Staroveški

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
SAŽETAK.....	IV
SUMMARY .....	V
1. UVOD.....	1
2. REZANJE PLAZMOM.....	2
2.1. Proces rezanja plazmom.....	4
2.2. Sustav za rezanje plazmom .....	6
2.2.1. Regulacijski sustav za rezanje plazmom.....	7
2.2.2. CNC upravljački sustav .....	8
2.2.3. Stol za rezanje plazmom .....	9
2.2.4. Glava za rezanje plazmom .....	9
2.3. Parametri procesa rezanja plazmom .....	11
2.4. Utjecaj parametara na kvalitetu reza .....	13
2.5. Tehnički plinovi pri rezanju plazmom .....	16
2.6. Postupci rezanja plazmom .....	17
2.6.1. Rezanje plazmom bez sekundarnog medija .....	17
2.6.2. Rezanje plazmom sa sekundarnim medijem .....	18
2.6.3. Rezanje plazmom s povećanim suženjem plazmenog luka .....	19
3. EKSPERIMENTALNI DIO .....	20
3.1. Oprema za rezanje.....	20
3.2. Radni materijal.....	23
3.3. Plan pokusa .....	24
3.3.1. Rezanje nehrđajućeg čelika plazmom.....	26
4. ZAKLJUČAK.....	35
LITERATURA.....	36
PRILOZI.....	38

**POPIS SLIKA**

Slika 1.	Plazma [3].....	2
Slika 2.	Nepreneseni i preneseni luk pri rezanju plazmom [4].....	3
Slika 3.	Početak rezanja plazmom [5] .....	4
Slika 4.	Ionizacija plazmenog plina [5] .....	4
Slika 5.	Stvaranje glavnog luka [5] .....	5
Slika 6.	Putanja plazmenog luka do radnog komada [5] .....	5
Slika 7.	Proces rezanja plazmom [5] .....	6
Slika 8.	CNC sustav za rezanje plazmom [4] .....	6
Slika 9.	Algoritam mikroprocesorskog kontrolera [7].....	8
Slika 10.	Kontrolni CNC sustav za rezanje plazmom (GE – Karlovac).....	9
Slika 11.	Unutarnje oštećenje sapnice [9] .....	10
Slika 12.	Oštećenje vanjskog dijela sapnice [9] .....	10
Slika 13.	Dijagram ovisnosti brzine o debljini materijala [11].....	12
Slika 14.	Utjecaj istrošenosti sapnice na stanje rezne površine.....	12
Slika 15.	Tijek gibanja glave CNC upravljanim rezanjem plazmom .....	13
Slika 16.	Izgled reza pri procesu rezanja plazmom .....	13
Slika 17.	Rezanje plazmom bez sekundarnog medija [4].....	18
Slika 18.	Rezanje plazmom sa sekundarnim medijem [4].....	19
Slika 19.	Rezanje plazmom u vodi [4] .....	19
Slika 20.	Rezanje plazmom s povećanim suženjem plazmenog luka [4] .....	19
Slika 21.	Prikaz CNC sustava za rezanje plazmom [14] .....	20
Slika 22.	Vodilice rezne glave [14] .....	21
Slika 23.	Izvor za rezanje plazmom [15] .....	22
Slika 24.	Geometrijski oblik za rezanje.....	26
Slika 25.	Pozicioniranje rezne glave u početni položaj za rezanje .....	26

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Nepravilnosti pri rezanju plazmom [12] .....	15
Tablica 2. Tehnički podaci izvora za rezanje plazmom [15] .....	22
Tablica 3. Kemijski sastav nehrđajućeg čelika X5CrNiMo17-12-2 [16].....	23
Tablica 4. Mehanička svojstva nehrđajućeg čelika X5CrNiMo17-12-2 [18] .....	23
Tablica 5. Parametri rezanja čelika debljine 8 mm .....	24
Tablica 6. Parametri rezanja čelika debljine 20 mm .....	25
Tablica 7. Izgled površina reza pri jakosti struje 130 A (8 mm).....	27
Tablica 8. Izgled površina reza pri jakosti struje 200 A (8 mm).....	28
Tablica 9. Izgled površina reza pri jakosti struje 260 A (8 mm).....	29
Tablica 10. Izgled površina reza pri jakosti struje 130 A (20 mm).....	30
Tablica 11. Izgled površina reza pri jakosti struje 200 A (20 mm).....	31
Tablica 12. Izgled površina reza pri jakosti struje 260 A (20 mm).....	32
Tablica 13. Izgled površina reza pri jakosti struje 400 A (20 mm).....	34

## **SAŽETAK**

U ovom završnom radu obrađena je tema rezanja plazmom. U teoretskom dijelu završnog rada opisan je postupak rezanja plazmom. Objašnjeni su glavni parametri rezanja te njihov utjecaj na kvalitetu reza. Opisana je pripadajuća oprema za rezanje i integracija sa CNC sustavima. Navedene su i objašnjene inačice postupaka rezanja plazmom. Eksperimentalni dio rada proveden je u Karlovcu u tvrtki General Electric gdje su izrezani uzorci na kojima je izvršena analiza utjecaja najvažnijih parametara obrade. Pomoću stroja za plazma rezanje Onyx proizvođača Eckert rezani su uzorci nehrđajućeg čelika debljina 8 i 20 mm. Uzorci su rezani različitim iznosima jakosti struje te primjenom različitih plinova i plinskih mješavina. Nakon rezanja promatran je utjecaj plazmenog plina, posmične brzine te jakosti struje na kvalitetu reza nehrđajućeg čelika.

Ključne riječi: plazma, rezanje, struja, brzina, kvaliteta



## **SUMMARY**

In this paper, the subject of plasma cutting was described. First part of the paper describes the theory of the plasma cutting, as well as the influence of the main cutting parameters and their impact on cutting quality. Different types of plasma cutting equipment and integration with CNC systems is also described. The experimental part of the work was carried out in Karlovac, in General Electric. Stainless steel samples, with thickness of 8 and 20 mm were cut using different cutting parameters and gas mixtures on Onyx Eckert cutting machine. Influence of plasma gas, cutting speed and currents on the quality of the stainless steel cut were observed.

Key words: plasma, cutting, current, speed, quality

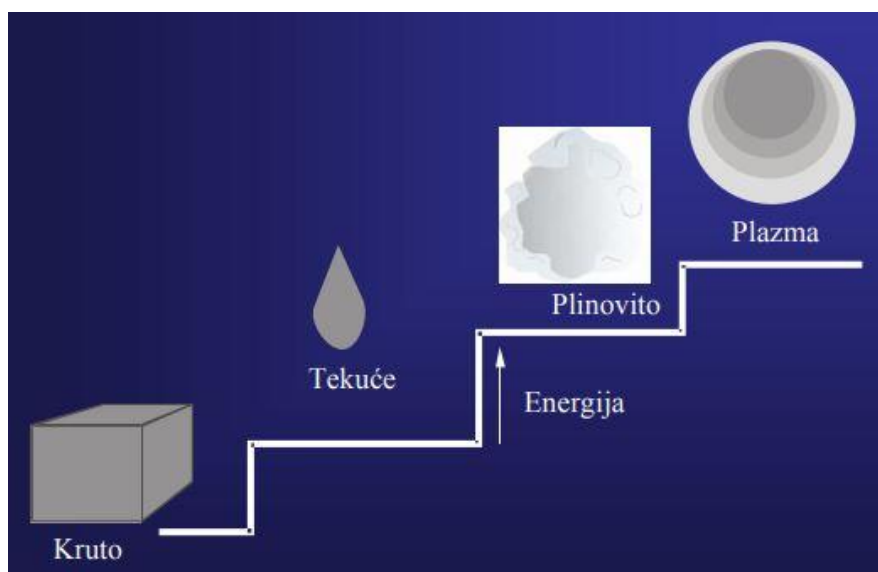
## 1. UVOD

U metaloprerađivačkoj industriji postupci rezanja najčešće su prvi u tehnološkom slijedu operacija izrade proizvoda. Zbog toga treba obratiti pozornost na odabir odgovarajuće tehnologije i osiguranje proizvodnje bez prekida u predviđenom vremenskom roku. Tehnologija rezanja treba biti takva da proizvod nakon rezanja bude spreman za slijedeću tehnološku operaciju, odnosno bez potrebe za naknadnom obradom reza. Rez bi trebao biti čist, sa što manje deformacija, jer svaka dodatna obrada zahtijeva dodatne troškove i povisuje cijenu proizvodnje. Stoga je odabir odgovarajućeg postupka rezanja izrazito važan za ukupne troškove proizvodnje. Pritisak konkurencije i internacionalizacija tržišta zahtijevaju porast proizvodnje i postizanje više razine kvalitete. Tehnologija rezanja bez naknadne obrade reza smanjuje troškove što je u konačnici jedan od čimbenika povećanja konkurentnosti proizvodnje. Prilikom odabira postupka rezanja bitno je uzeti u obzir i ostale čimbenike koji utječu na troškove rezanja kako bi se dobila stvarna cijena istog postupka izražena po satu rezanja odnosno po metru reza. Rezultati mogu također dati i krivu sliku jer neki postupak može biti jeftiniji po metru reza, a u konačnici skuplji uzimajući u obzir troškove naknadnih operacija koje je potrebno obaviti.

Rezanje plazmom razvijeno je krajem 1950-tih za rezanje metala koji nisu mogli biti rezani plinskim plamenom zbog njihovog kemijskog sastava, kao što su nehrđajući čelik, aluminij i bakar. Suvremeni postupci rezanja plazmom sukladno trendu napretka tehnologije rezanja, koriste sve mogućnosti povezivanja s CNC sustavima što rezultira postizanjem velikih brzina i izrazito dobru kvalitetu reza. Zbog mogućnosti integracije sa CNC sustavima, postizanja iznimno velikih posmičnih brzina i vrlo uske zone utjecaja topline danas se rezanje plazmom koristi i za niskolegirane i nelegirane čelike. Rezanje plazmom u izravnoj je konkurenciji s drugim tehnikama rezanja poput laserskog rezanja ili rezanja vodenim mlazom. Međutim, može biti i alternativa mehaničkim tipovima obrade poput bušenja i probijanja.

## 2. REZANJE PLAZMOM

Plazma je električki provodljiv, disociran i visokoioniziran plin. Ionizacija plinova uzrokuje stvaranje slobodnih elektrona i pozitivnih iona među atomima plina. Broj pozitivnih i negativnih naboja je jednak pa je plazma kao cjelina električki neutralna. [1] U fizici često se naziva i četvrtim agregatnim stanjem. Za generiranje tehničke plazme plin se jako zagrijava pomoću nekog izvora topline ili je podvrgnut jakom električnom polju kako bi se pretvorio u ionizirajuće stanje. [1 – 3]

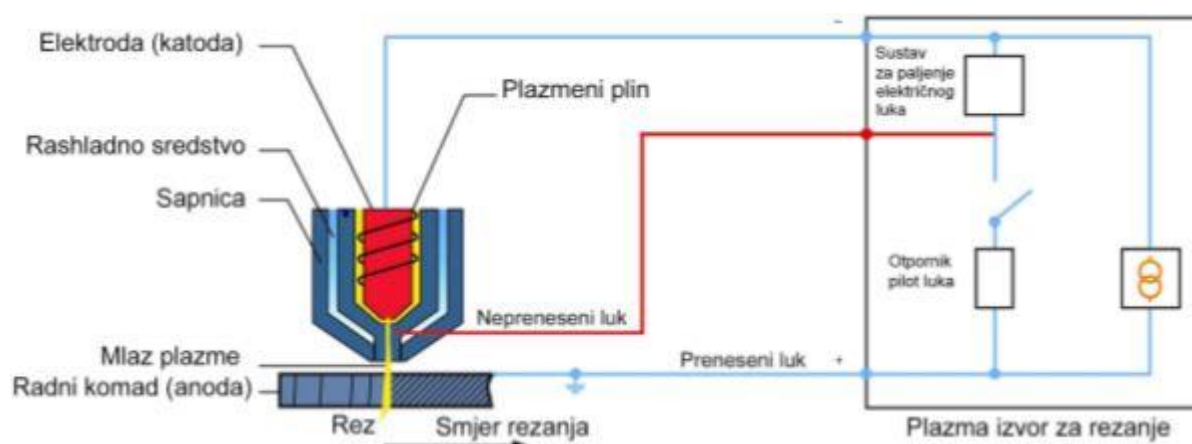


Slika 1. Plazma [3]

Rezanje plazmom je postupak koji se zasniva isključivo na energiji dovedenoj izvana, to jest energijom tehničke plazme koja tali radni komad, a nastalu talinu izbacuje mlaz plinova koji se koriste za stvaranje plazme. Plazmeni mlaz dobiva se tlačenjem određenog plina kroz električni luk. Električni luk se uspostavlja između volframove elektrode spojene na negativan pol i radnog komada ili sapnice radne glave samog uređaja. Zavisno o paramerima procesa moguće je formirati preneseni i nepreneseni luk (Slika 2.).

Nepreneseni električni luk se uspostavlja kada je volframova elektroda spojena na negativan pol izvora struje i sapnice radne glave uređaja (pozitivan pol). Nepreneseni luk pogodan je za naštrcavanje i za rezanje predmeta manjih debljina koji nisu električki vodljivi (npr. polimera) te za paljenje električnog luka (pilot luk). Za ostale materijale koristi se preneseni luk.

Preneseni luk se uspostavlja između volframove elektrode spojene na negativan pol izvora struje i radnog komada (pozitivan pol). Ostvaruje se veći unos toplinske energije u radni komad koji je ovdje dio strujnog kruga. Za pokretanje prenesenog luka koristi se otpornik postavljen u strujni krug. Prvo se pali „pilot luk“ koji ograničava struju na oko 50 A koja se uspostavlja između sapnice plazmenog luka i elektrode. Nakon što se dotakne radni komad, glavna struja protječe između elektrode i radnog komada, te se tada formira preneseni luk. [4]

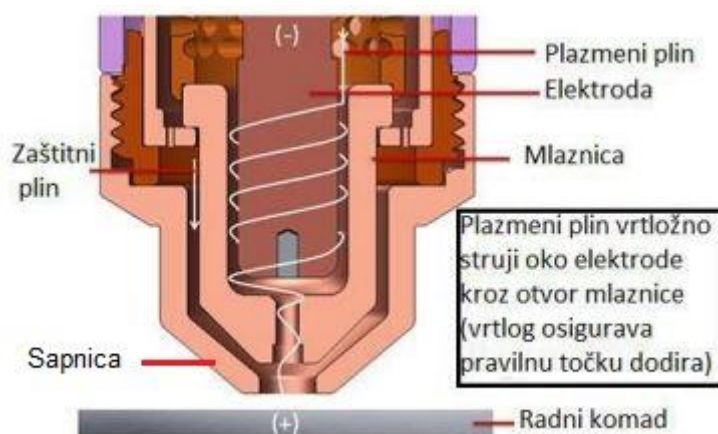


Slika 2. Nepreneseni i preneseni luk pri rezanju plazmom [4]

Električni luk održava se u cilindričnom kanalu hlađenim vodom ili plinom. U kanal se pod pritiskom dovodi plin ( $\text{Ar}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$  i njihove mješavine te zrak ili kisik) koji prolaskom kroz električni luk disocira i ionizira zbog toplinske energije električnog luka i čini ih električki vodljivim. Zbog visoke gustoće energije i temperature plazma se prema radnom komadu širi i do tri puta većom brzinom od brzine zvuka. Temperatura mlaza plazme je izrazito visoka ( $20\,000 - 40\,000\text{ }^\circ\text{C}$ ) i zajedno s kinetičkom energijom plazmenog plina omogućuje rezanje svih električki vodljivih materijala pri velikim posmičnim brzinama, ovisno o debljini materijala koji se reže. [4]

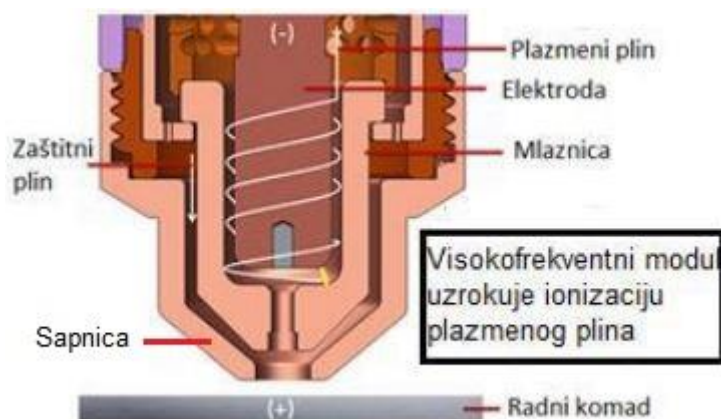
## 2.1. Proces rezanja plazmom

Unutar glave za rezanje plazmom elektroda i unutarnja mlaznica se ne dodiruju, već su međusobno odvojene distantnim prstenom sa spiralnim utorima kojima se ostvaruje vrtložno strujanje plazmenog plina. Između mlaznice i sapnice nalazi se prostor kojim struji zaštitni plin. Proces počinje stvaranjem razlike potencijala uz istovremeno propuštanje plina kroz crijevo do radne glave. Sapnica je privremeno spojena na pozitivan pol izvora struje, a elektroda na negativan. (Slika 3.)



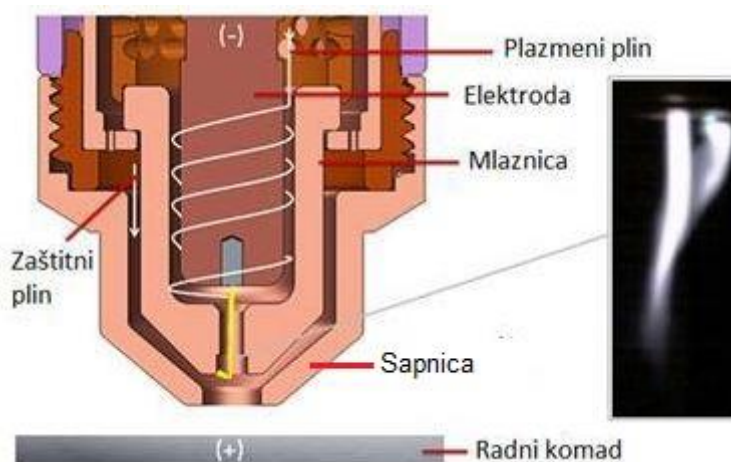
Slika 3. Početak rezanja plazmom [5]

Nadalje, visokofrekventnim modulom koji uzrokuje ionizaciju plina, uključuje se pilot luk male snage. Pilot luk se stvara između elektrode i radnog komada. Također se stvara inicijalni plazmeni mlaz. (Slika. 4.)



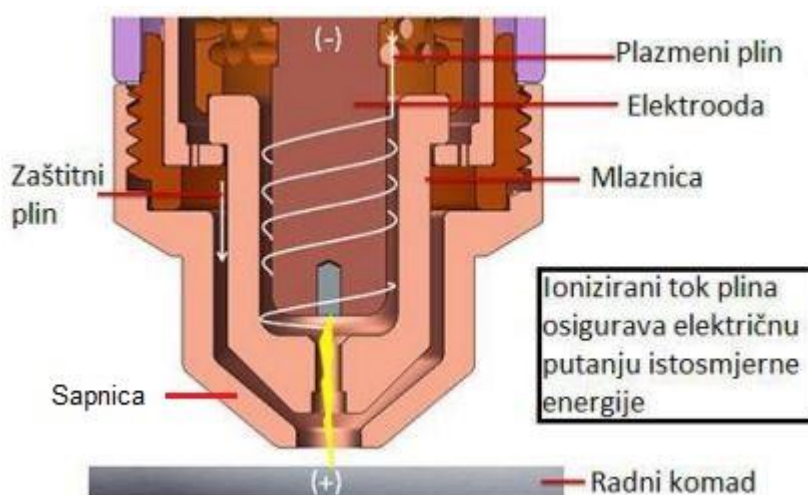
Slika 4. Ionizacija plazmenog plina [5]

U trenutku kada pilot luk dođe u kontakt s radnim komadom koji je uzemljen, struja prelazi s elektrode na radni komad. Visokofrekventni modul se isključuje te se strujni krug zatvara i počinje stvaranje glavnog plazmenog luka. (Slika 5.)



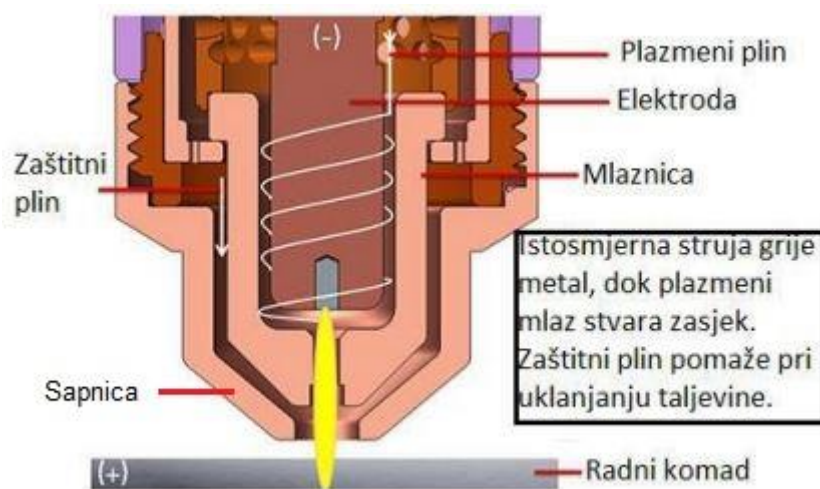
Slika 5. Stvaranje glavnog luka [5]

Nakon toga izvor istosmjerne struje generira iznos jakosti struje rezanja namještenu od strane operatera te se vrši dostavno gibanje glave do obratka. Kada plazmeni luk dodirne radni komad dolazi do probijanja i rezanja radnog komada (Slika 6.). Zaštitni plin struji kroz sapnicu, obavija mlaz te na taj način štiti reznju površinu.



Slika 6. Putanja plazmenog luka do radnog komada [5]

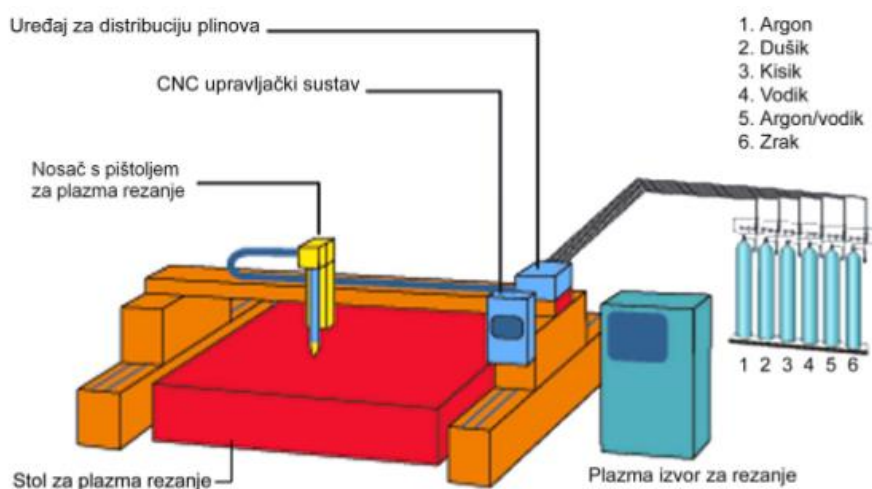
Oblik otvora mlaznice, sapnice i njihov promjer dodatnu sužuju plazmeni luk što rezultira manjom širinom reza te smanjenim nagibom reza.



Slika 7. Proces rezanja plazmom [5]

## 2.2. Sustav za rezanje plazmom

Cilj sustava (Slika 8.) je da zadovolji što je moguće ekonomičnije rezanje radnih komada u što kraćem vremenskom roku. Za ostvarenje cilja potrebno je poznavati sustav za rezanje plazmom, njegove prednosti, nedostatke, omjere plinova prilikom njihovog miješanja te možda i najbitnije, poznavati materijal koji se reže i njegova svojstva. Operator ima značajnu ulogu jer prilagođavanjem parametara rezanja može dobiti visokokvalitetan proizvod uz relativno male troškove i smanjeno vrijeme trajanja procesa.



Slika 8. CNC sustav za rezanje plazmom [4]

Troosni sustavi danas su norma, no postoje i sustavi sa 5 pa čak i do 7 stupnjeva slobode gibanja. U početku su se koristili koračni motori, no upravljački sustavi za takvu vrstu motora radili su u otvorenoj petlji, što znači da nije bilo povratne informacije o stvarnom položaju. Stoga su uvedeni servo motori koji su putem enkodera davali povratnu informaciju o stvarnom položaju na kojem se nalazi motor. Upravljačko računalo prima povratne informacije i održava željenu poziciju. [6]

Sustav za strojno rezanje plazmom sastoji se od:

- regulacijskog sustava za rezanje plazmom
- CNC upravljačkog sustava
- nosača s radnom glavom za rezanje plazmom
- uređaja za distribuciju plinova
- stola sa rezanje plazmom
- posmičnih prigona

### **2.2.1. Regulacijski sustav za rezanje plazmom**

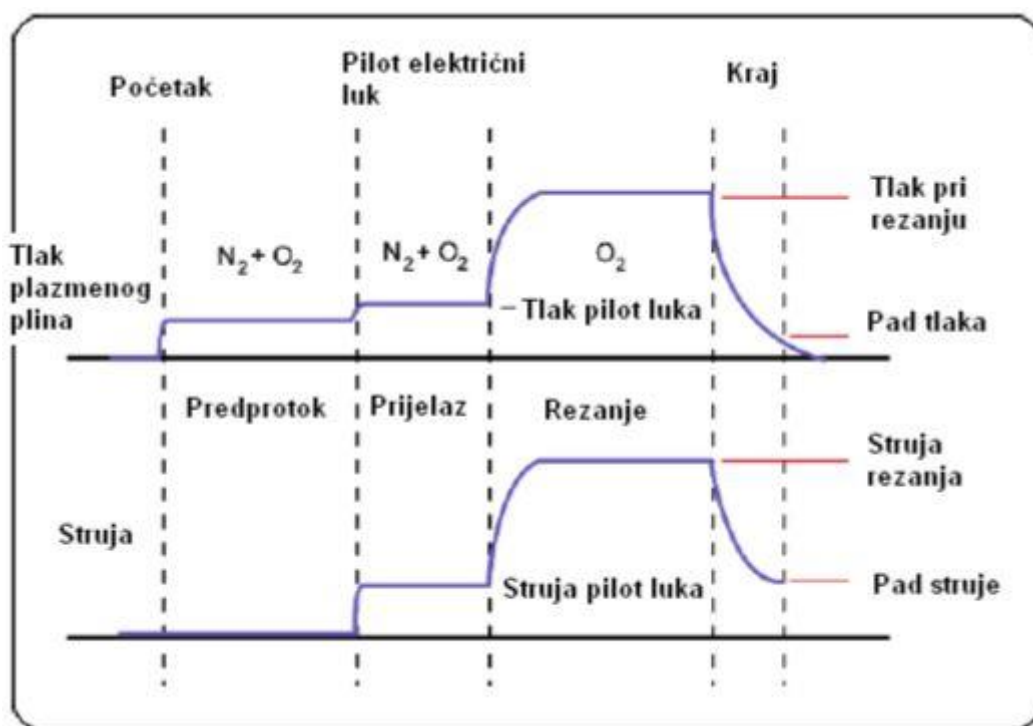
Regulacijski sustav za rezanje plazmom najvažniji je dio CNC sustava. Izbor regulacijskog sustava vrši se na osnovi konstrukcije gorionika plazme koji se koristi, vrste i debljine radnog komada koji se reže i opsega posmičnih brzina. Također određuje koje se vrste plazmenog i zaštitnog plina mogu koristiti te kako se ti plinovi miješaju. Takvi sustavi imaju mogućnost regulacije zadanih vrijednosti jakosti struje i tlaka plina na početku rezanja čime se produžuje vijek trajanja potrošnih dijelova za rezanje plazmom. [4,7]

Regulacijski sustav za rezanje omogućuje:

- početak protoka plinske mješavine ( $O_2 + N_2$ ) u trenutku paljenja električnog luka što čini paljenje bržim i lakšim te sprječava preveliko trošenje elektrode
- regulaciju jakosti struje rezanja i protok plina na početku procesa rezanja što smanjuje toplinsko opterećenje katode i produljuje vijek trajanja iste
- regulaciju jakosti struje rezanja i protok plina na kraju procesa rezanja što omogućuje skrućivanje oksida katode prije njihovog uklanjanja s površine katode [7]

Slika. 9 prikazuje algoritam mikroprocesorskog kontrolera.

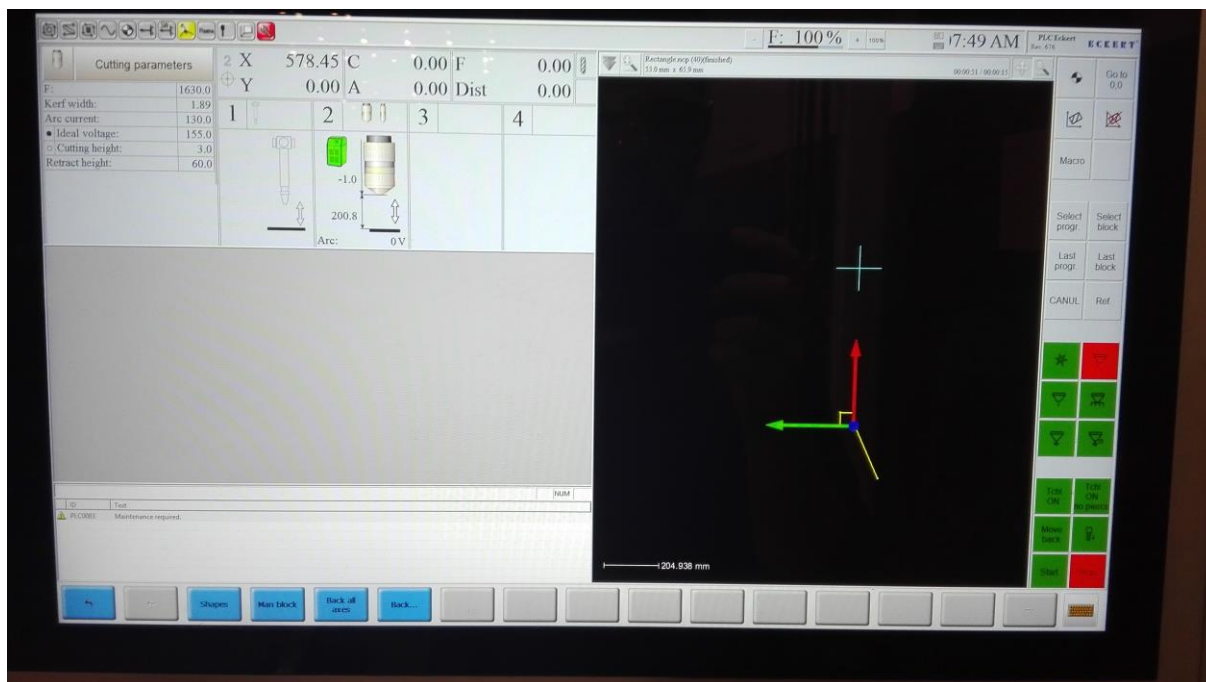




Slika 9. Algoritam mikroprocesorskog kontrolera [7]

### 2.2.2. CNC upravljački sustav

Upravljački sustav ima velik utjecaj na kvalitetu reza. Sustav za vođenje mora imati pogone s dovoljnom dinamikom kako bi se postigle zadane posmične brzine. Sustav za vođenje i plazma uređaj su povezani preko sučelja kojim se provodi potrebna izmjena informacija. Slika 10. prikazuje CNC sustav za plazma rezanje proizvođača Eckert. Moguće je odabrati geometrijski oblik predmeta, potrebno je odrediti njegove dimenzije te izabrati jakost struje rezanja koju dozvoljava određeni upravljački sustav. Postoje upravljački sustavi u kojima je potrebno definirati posmičnu brzinu. Kada se želi izrezati kontura složenog geometrijskog oblika potrebno ju je programirati u CAD/CAM paketima za toplinsko rezanje. Programirana kontura se može pohraniti u računalo i nakon toga se može učitati u CNC računalo pomoću USB-a ili mrežnog priključka. [9]



Slika 10. Kontrolni CNC sustav za rezanje plazmom (GE – Karlovac)

### 2.2.3. Stol za rezanje plazmom

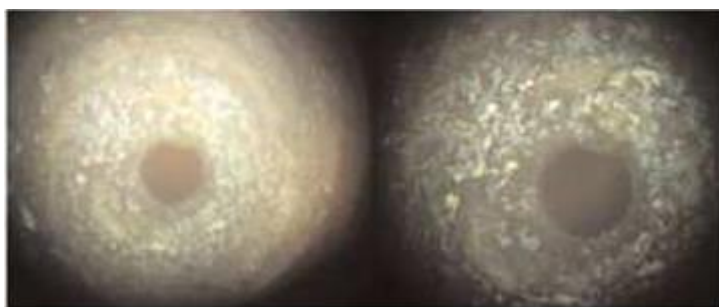
Stol služi za postavljanje i pozicioniranje limova za rezanje. Dimenzije stola mogu biti različite, a mogu se raditi i po određenom zahtjevu. Dimenzije ovise o veličini, debljini i težini limova koji će se rezati. Danas se rade u izvedbi sa ispušnim sustavom koji usisava nečistoće prilikom procesa rezanja. [4]

### 2.2.4. Glava za rezanje plazmom

Rezanje plazmom uvelike ovisi o konstrukciji glave za plazma rezanje. Glava za rezanje plazmom konstruirana je na način da struja i plinovi koji su potrebni za rezanje mogu istodobno prolaziti kroz nju bez ikakvog utjecaja jedne veličine na drugu. Glavni dijelovi glave za rezanje plazmom su elektroda, sapnica, dovodnik plina i zaštitna navlaka. Funkcija navedenih dijelova detaljnije je opisana u procesu rezanja plazmom (poglavlje 2.1.) To su potrošni dijelovi i što su oni kvalitetniji i dugotrajniji, bolja je i kvaliteta rezanja. [9]

Sapnica – sapnica je konstruirana tako da je njen otvor malo veći od plazmenog mlaza. To omogućava da sapnica sadrži i fokusira plazmeni mlaz bez nepovoljnog utjecaja na samu sapnicu. Oštećena sapnica bitno utječe na kvalitetu reza. Oštećenja mogu biti unutarnja i vanjska. Unutarnja oštećenja sapnice (Slika 11.) mogu biti uzrokovana pregaranjem elektrode,

neodgovarajućim protokom plina te puštanjem previsoke ili preniske struje. Oštećenja vanjskog dijela sapnice (Slika 12.) nastaju zbog štrcanja metala prilikom premale udaljenosti glave od radnog komada i zbog uspostavljanja električnog luka između elektrode i radnog komada. Zbog navedenih mogućih oštećenja sapnica se oblaže zaštitnom navlakom kako bi se spriječilo oštećivanje sapnice i produljio vijek trajanja. [9]



Slika 11. Unutarnje oštećenje sapnice [9]



Slika 12. Oštećenje vanjskog dijela sapnice [9]

Dovodnik plina – kreira vrtlog plazmenih plinova i održava ga centričnim s vrhom elektrode i središtem otvora sapnice. Tlak plazmenog plina utječe na vijek trajanja elektrode, visoki tlakovi uzrokuju brzo trošenje, ali se ostvaruje bolja kvaliteta reza. Niski tlakovi produljuju vijek trajanja elektrode uz nisku kvalitetu reza. Intenzitet plinskog vrtloga kreiranih s dovodnikom direktno utječe na tlak plina. Visok intenzitet plinskog vrtloga sužava plazmeni luk, povećava tlak plina i doprinosi boljoj kvaliteti rezanja. Plinski vrtlog niskog intenziteta omogućava duži vijek trajanja elektrode, no i slabiju kvalitetu rezanja. [9]

Elektroda – do zatajenja elektrode dolazi kada se emitirajući element istroši toliko da se električni luk počne odbijati od okružujuće bakrene ili srebrne navlake. U trenutku kada električni luk dođe u kontakt s tom navlakom može doći do uništenja cijele elektrode. Neispravan portok plina također može dovesti do preuranjenog propadanja elektrode.

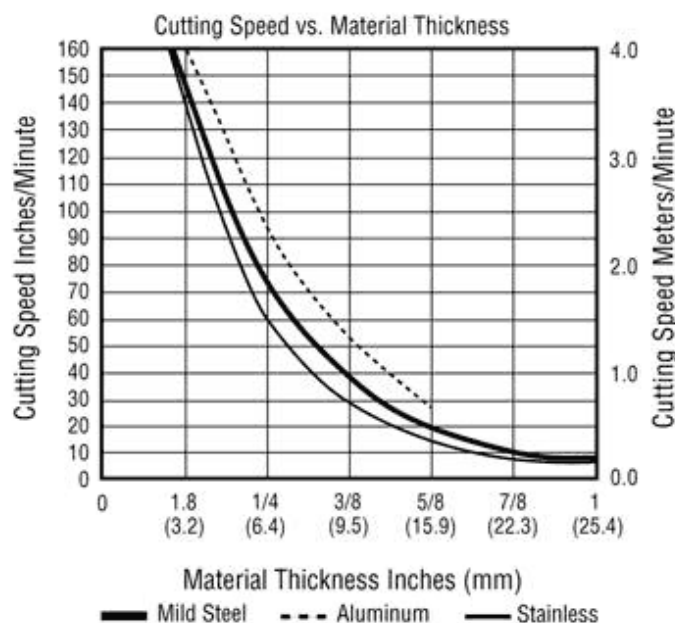
### 2.3. Parametri procesa rezanja plazmom

Najvažniji parametri koji utječu na kvalitetu procesa rezanja plazmom:

- snaga plazme (produkt jakosti struje i napona)
- posmična brzina
- tlak i vrsta plina
- istrošenost sapnice
- udaljenost sapnice od radnog komada

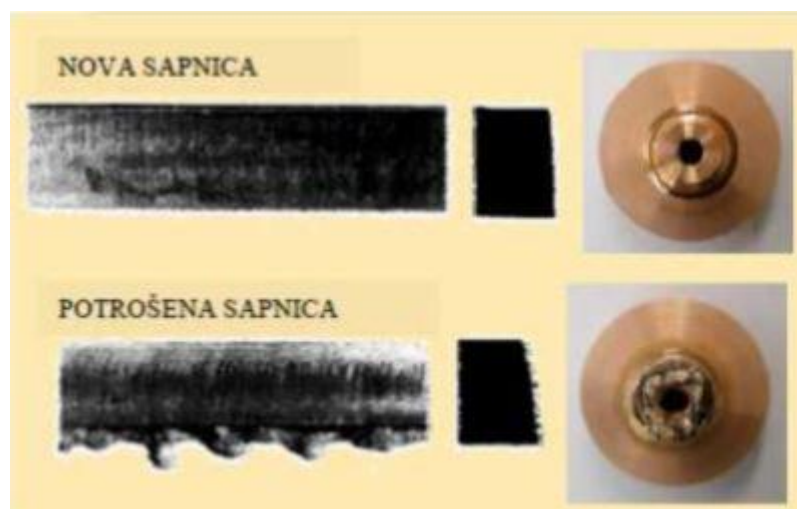
Jakost struje se mora podesiti prema materijalu koji se reže i njegovoj debljini. Zahtjevom za većom produktivnosti koristi se najveći iznos jakosti struje koju određeni sustav dozvoljava, a prilikom zahtjeva za boljom kvalitetom reza koristi se manji iznos jakosti struje. Manja jakost struje daje manje posmične brzine što daje kvalitetniji rez. Jakost struje utječe na odabir odgovarajuće sapnice. Promjer sapnice od 1,5 mm će podnositi struju od 100 A, dok će sapnica od 6 mm podnositi struju od 1000 A. Jakost struje treba biti takva da se ostvaruje 95% izlazne snage na sapnici. Manja jakost struje to jest manja izlazna snaga od one za koju je sapnica predviđena za posljedicu će imati manju energiju plazmenog mlaza, nefokusiran mlaz to jest mlaz koji nije u središnjoj osi sapnice. Prevelika izlazna snaga, odnosno jakost struje imat će kao posljedicu slabiji luk i grublju površinu reza. [10]

Posmična brzina bitno utječe na kvalitetu reza. Ako je brzina prevelika prvenstveno se može dogoditi da se rez niti ne ostvari odnosno da mlaz ne penetrira kroz materijal. Osim toga može doći do zaostajanja luka te prouzrokovati stepeničaste brazde i nastajanje srha na donjoj površini radnog komada koju je potrebno naknadno obraditi. Prilikom premale posmične brzine nastaje širi rez od predviđenog, a rastaljeni metal se neće moći ispuhati plinom već će se nakupljati na dnu reza kao srh. Najbolji način definiranja brzine je promatranje plazmenog luka. Luk bi trebao biti vertikalni u odnosu na radni komad. Slika 13. prikazuje dijagram brzina u ovisnosti o debljini materijala.



Slika 13. Dijagram ovisnosti brzine o debljini materijala [11]

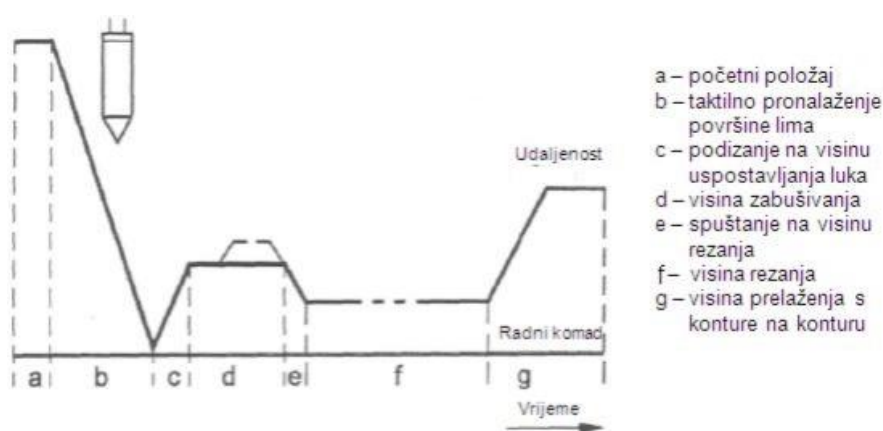
Istrošenost sapnice ima najveći utjecaj na okomitost reza i toleranciju nagiba. Istrošenost utječe i na stvaranje srha na reznom rubu. Slika 9. prikazuje utjecaj istrošenosti sapnice na izgled rezne površine te pojavu srha na radnom komadu.



Slika 14. Utjecaj istrošenosti sapnice na stanje rezne površine

Udaljenost sapnice od radnog komada ima veliki utjecaj na kvalitetu reza. Od velikog je značaja podešen i duž cijelog reza konstantno održavan razmak između sapnice i radnog komada. Kako bi se postigla ravnomjerna širina reza i dimenzija radnih komada, nužno je ostvariti regulaciju udaljenosti sapnice od radnog komada.

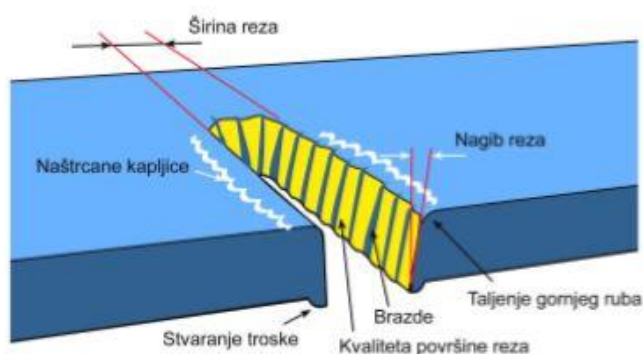
Regulacija udaljenosti (Slika 15.) omogućuje da se sapnica nalazi uvijek na istoj udaljenosti od radnog komada, bilo da je uzorak valovit ili da neravno naliježe na radni stol. U početku rezanja se pomoću taktilnog senzora odredi vertikalni položaj glave, na način da se primiče limu sve dok senzor ne dodirne površinu lima. Dodirom se zatvara električni krug i računalo prima informaciju da je glava postavljena na odgovarajuću visinu u odnosu na obradak. Ta, početna visina glave je nešto veća od visine rezanja kako bi se spriječilo štrcanje metala u sapnicu. Nakon probijanja materijala, glava se pomiče na visinu rezanja i započinje rezanje. Kad započne rezanje, udaljenost se održava očitavanjem napona prenesenog električnog luka.[6]



Slika 15. Tijek gibanja glave CNC upravljanim rezanjem plazmom

## 2.4. Utjecaj parametara na kvalitetu reza

Iznimno značajan utjecaj na kvalitetu reza je poznavanje glavnih parametara procesa jer loša kvaliteta reza zahtijeva naknadnu obradu i povisuje troškove proizvodnje. Slika 16. prikazuje izgled reza kod rezanja plazmom sa svim značajkama.



Slika 16. Izgled reza pri procesu rezanja plazmom

Zona utjecaja topline pri rezanju plazmom je područje oko reza koje je prilikom procesa rezanja bilo pod utjecajem topline. Pri rezanju plazmom zona utjecaja topline je uska zbog uskog fokusa plazmenog mlaza i brzine samog procesa. Primjenom procesa rezanja plazmom u vodi zona utjecaja topline se dodatno smanjuje.

Osnovno svojstvo reza jest njegova širina, odnosno količina metala uklonjenog mlazom plazme. Čimbenici koji utječu na širinu reza jesu jakost struje rezanja, posmična brzina i udaljenost sapnice od radnog komada. Drugo važno svojstvo kvalitete reza je nagib reza odnosno kut površine reza. Ako je površina reza od gornje do donje površine radnog komada pod  $90^\circ$ , tada je kut površine reza jednak nuli. Vrtložnim strujanjem plinova pri rezanju plazmom, nagib reza na gornjoj površini radnog komada iznosi  $1^\circ$  do  $3^\circ$ , a  $3^\circ$  do  $8^\circ$  na donjoj površini radnog komada. Kod laminarnog strujanja zaštitnih plinova nagib na obje strane radnog komada iznosi 4 do  $8^\circ$ . Smanjivanjem posmične brzine može se smanjiti kut površine reza. Isto tako smanjivanje udaljenosti sapnice može bitno utjecati na nagib reza, manja udaljenost znači manji nagib reza.

Taljenje gornjeg ruba reza ovisi o debljini materijala koji se reže te o samom izboru postupka rezanja plazmom i zaštitnog plina. Do pojave taljenja gornjeg ruba dolazi zbog toga jer plazmeni mlaz ima najvišu temperaturu na izlazu iz sapnice to jest na gornjoj strani radnog komada. Taljenje gornjeg ruba se najviše pojavljuje prilikom rezanja tanjih radnih komada. Može se svesti na minimum primjenom zaštitne atmosfere (plin, voda).

Troska (srh) nastaje na donjoj površini radnog komada, a ovisi o posmičnoj brzini, jakosti struje rezanja te o vrsti materijala i njegovoj debljini. Nastajanje srha također može biti uzrokovano i premalom ili prevelikom brzinom. Zbog toga je potrebno namjestiti odgovarajuće parametre rezanja kako bi se izbjegli dodatni troškovi uklanjanja srha. Isto tako je moguće nastajanje male količine srha na gornjoj površini radnog komada u obliku naštrcanih kapljica koje nastaju kao posljedica male posmične brzine ili prevelike udaljenosti sapnice od radnog komada. [11]

Nepravilnosti i njeni uzroci pri rezanju konstrukcijskih čelika, nehrđajućih čelika i Al – legura navedeni su u Tablici 1. Treba napomenuti da gornji rub reza čini  $1/3$  debljine lima, a donji rub čine preostale  $2/3$  debljine lima.

Tablica 1. Nepravilnosti pri rezanju plazmom [12]

Nepravilnosti	Najčešći uzrok s obzirom na vrstu materijala		
	Konstrukcijski čelik	Nehrđajući čelik	Al – legura
Srh na gornjem rubu	Prevelik razmak sapnice od komada, lako otklanjanje	Prevelik razmak sapnice od komada, lako otklanjanje, pogrešna koncentracija vodika	Prevelik razmak sapnice od komada, lako otklanjanje
Hrapavost na gornjem rubu	-	Pogrešna koncentracija vodika, razmak i brzina	Premali protok vodika
Nagib reza (pozitivan)	Prevelika brzina, prevelik razmak sapnice od komada	Prevelika brzina, prevelik razmak sapnice od komada, premalo vodika	Prevelika brzina, premali protok vodika
Nagib reza (negativan)	-	-	Previše vodika
Neravnine blizu donjeg ruba	Ponekad kod prebrzog starta	Samo na granici optimalnih parametara	-
Neravnine blizu gornjeg ruba	Previše vodika	Previše vodika	Premala brzina, premalo vodika
Konkavne stranice	-	Previše vodika	Previše vodika, premala brzina
Konveksne stranice	Prevelika brzina	Prevelika brzina, premalo vodika	-
Srh na donjem rubu	Previše vodika, prevelika brzina	Previše vodika, premala brzina	Prevelika brzina
Hrapavost na donjem rubu	Premali razmak sapnice	-	Premalo vodika



## 2.5. Tehnički plinovi pri rezanju plazmom

Uz sve prije navedene čimbenike koji imaju utjecaj na kvalitetu rezanja, ključni utjecaj na stabilnost procesa rezanja i kvalitetu reznih površina imaju tehnički plinovi. Pri odabiru tehničkog plina najvažniju ulogu imaju njegova fizikalna svojstva, kao što su ionizacija, energija disocijacije, toplinska vodljivost i kemijska reaktivnost. Potreban je pravilan odabir plazmenog plina/mješavine za određeni materijal u cilju postizanja zahtjevane kvalitete reza.

**Zrak** se koristi za rezanje nelegiranih i nehrđajućih čelika, ali i za rezanje aluminijskih. Komprimirani zrak treba biti očišćen od čestica ili vlage. Omogućuje dobru kvalitetu i brzinu procesa rezanja kod navedenih vrsta materijala. Glavne komponente zraka su dušik (70%) i kisik (21%). Prilikom rezanja zrakom može doći do nitracije i oksidacije površine reza koje mogu uzrokovati poroznost.

**Argon** pripada grupi inertnih plinova, što znači da ne reagira kemijski s materijalom prilikom procesa rezanja. Ima najveću atomsku masu od svih plinova što doprinosi visokoj energiji za ispuhivanje taline. Niska energija ionizacije omogućuje lagano uspostavljanje luka. Rezultat toga je visoka kinetička energija plazmenog mlaza. Zbog relativno niske toplinske vodljivosti i niskog toplinskog kapaciteta argon nije posve idealan kao jedini plazmeni plin za rezanje, već ga se koristi u mješavini plinova. Također i cijena mu je nešto veća od ostalih plinova.

**Vodik**, suprotno od argona, ima jako dobru toplinsku vodljivost. Disocira pri visokim temperaturama što dovodi do toga da se većina energije povlači s električnog luka. Time dolazi do hlađenja površinskog sloja i sužavanja električnog luka. Čisti vodik nije prikladan za upotrebu zbog male atomske mase.

**Dušik** je inertni plin koji reagira s materijalom pri visokim temperaturama, dok pri niskim ne reagira. Uspoređujući fizička svojstva, toplinsku provodljivost i atomsku masu, nalazi se negdje između argona i vodika. U mnogim se slučajevima pokazao kao najbolje rješenje je za rezanje aluminijskih i nehrđajućih čelika. Kao dodatak argonu, povećava toplinsku vodljivost i kvalitetu reza. Može biti korišten kao jedini plin pri rezanju tankih limova.

**Kisik** klasificiran je isto kao dušik po svojstvima toplinske vodljivosti. Kisik djeluje oksidirajuće na talinu prilikom čega se oslobađa dodatna toplina koja omogućava veću brzinu procesa rezanja. Međutim, reakcija s radnim komadom prolazi vrlo sporo čime se komad rastapa. Cijena kisika je vrlo visoka i kisik ima velik utjecaj na vijek trajanja potrošnih dijelova. Uglavnom se koristi kao sekundarni plin prilikom procesa rezanja nelegiranih i niskolegiranih čelika. Može se koristiti i za nehrđajući čelik te za rezanje aluminija, no površina reza je grublja i samim time se ne preporuča za rezanje tih materijala.

**Plinske mješavine** dobivaju se miješanjem navedenih plinova. Dobra toplinska svojstva vodika mogu se dobro kombinirati s velikom atomskom masom argona. Kombinacija plinova argona i vodika omogućava rezanje nehrđajućih čelika i aluminija debljina većih od 5 mm, gdje sadržaj vodika ovisi o debljini materijala. Deblji materijal zahtijeva veću količinu vodika u plinskoj mješavini. Maksimalan udio je 35% vodika što je i najčešća primjena takve mješavine (65% argona i 35% vodika). Pri rezanju plazmom koriste se i druge plinske mješavine: dušik – vodik, argon – vodik – dušik. Primjenom vodika u plinskoj mješavini dušika i vodika smanjuje se oksidacija površine reza. Dodavanjem dušika plinskoj mješavini argona i vodika moguće je postići veće posmične brzine.[4,13]

## 2.6. Postupci rezanja plazmom

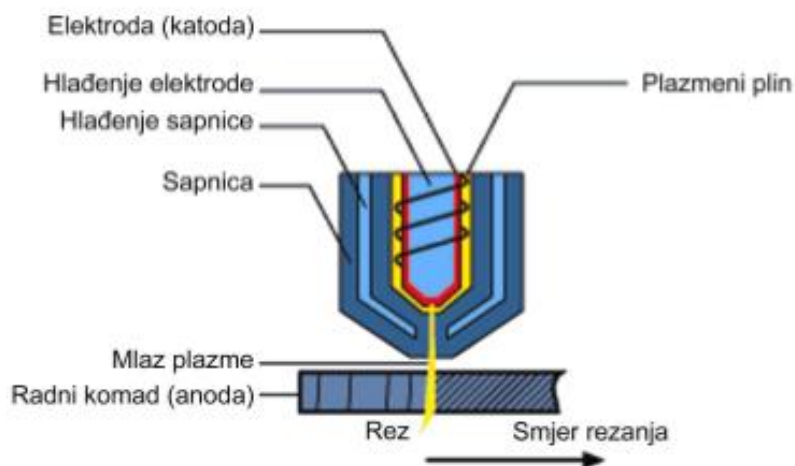
Prisustvom današnje tehnologije na raspolaganju su slijedeće varijante rezanja plazmom:

- rezanje plazmom bez sekundarnog medija u atmosferskim uvjetima (standardna plazma)
- rezanje plazmom sa sekundarnim medijem u atmosferskim uvjetima ili u vodi
- rezanje plazmom sa suženim lukom plazme

### 2.6.1. *Rezanje plazmom bez sekundarnog medija*

Proces rezanja plazmom bez sekundarnog medija (slika 17.), koristi se kod:

- ručnog rezanja i žlijebljenja
- manjeg broja dijelova za rezanje
- manje debljine limova
- manjih zahtjeva za kvalitetu reza

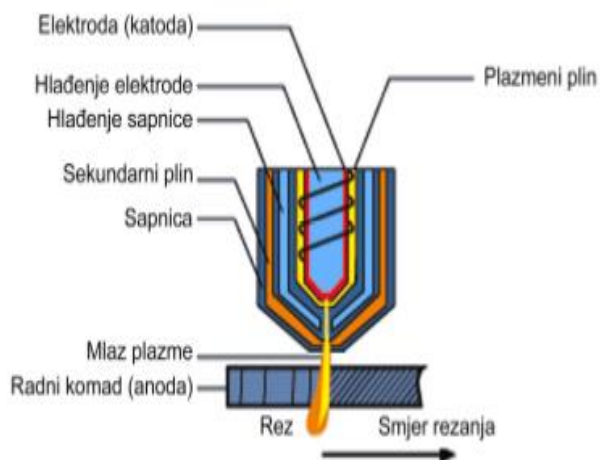


Slika 17. Rezanje plazmom bez sekundarnog medija [4]

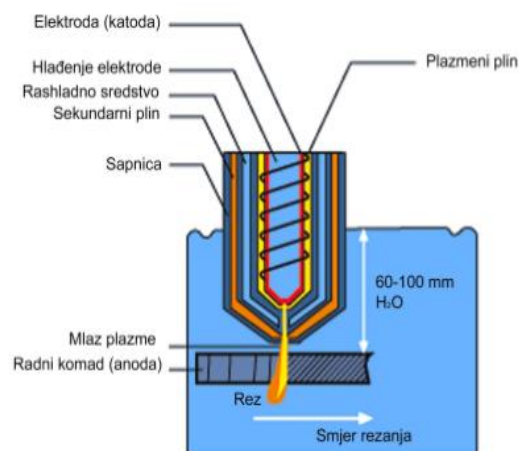
Standardni postupak rezanja plazmom odnosno rezanje plazmom bez sekundarnog medija prikazano je na Slici 17. Kod takvih postupaka rezanja koristi se samo jedan plin (kisik, dušik ili zrak) koji istovremeno hladi i stvara plazmeni luk. Glavna upotreba ovakvog postupka rezanja plazmom je kod ručnih postupaka rezanja. Materijali koji se mogu rezati su do debljine od 160 mm. Također, postoji i primjena s CNC sustavima za vođenje glave za rezanje plazmom, kod robotiziranog rezanja cijevi, različitih profilnih priprema i pakiranja limova u čeličanama.[4]

### 2.6.2. *Rezanje plazmom sa sekundarnim medijem*

U postupku rezanja plazmom sa sekundarnim medijem koaksijalno sa sapnicom glave nalazi se sapnica za dovod sekundarnog medija. Sekundarni medij koji se koristi može biti plin ili voda. Zaštitni plin se koristi za zaštitu utjecaja atmosfere na područje oko samog reza, čime se dobije usmjereniji električni luk i čišći rez. Poseban utjecaj je vidljiv kod rezanja visokolegiranih čelika jer dolazi do reakcije kisika sadržanog u zraku s površinom reza. Dolazi do oksidacije odnosno stvara se sloj oksida koji u većini slučajeva zahtijeva dodatnu obradu i skidanje tog oksidnog sloja. Postupak se može izvoditi i na zraku i u vodi. Takvim načinom rezanja znatno je smanjen utjecaj plazme na okolinu i smanjen utjecaj topline na kvalitetu reza. Nedostak rezanja plazmom u vodi je to što radni komad nije vidljiv i ne može se sa točnošću utvrditi ostvaruje li se kvalitetan rez. Brzine su smanjene kao i mogućnost rezanja debljih radnih komada. Maksimalna debljina lima za postupak rezanja plazmom na zraku iznosi 160 mm. Rezanje plazmom u vodi režu se materijali do debljine 20 mm.[4]



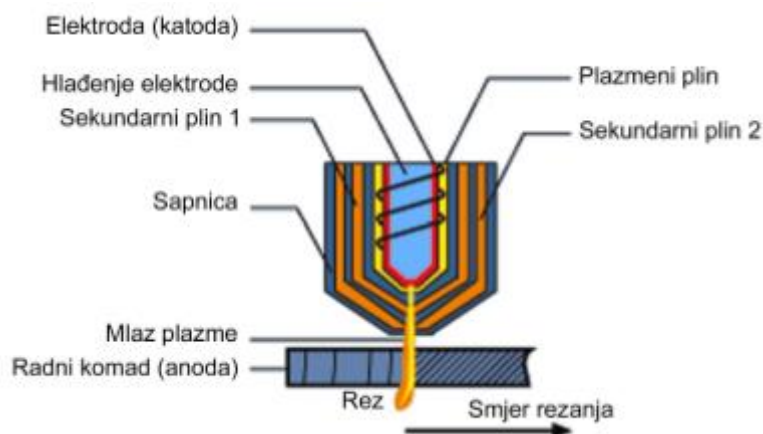
Slika 18. Rezanje plazmom sa sekundarnim medijem [4]



Slika 19. Rezanje plazmom u vodi [4]

### 2.6.3. Rezanje plazmom s povećanim suženjem plazmenog luka

Postupak se koristi pri rezanju tanjih materijala pri manjim brzinama čime se dobije vrlo kvalitetan rez. Kvalitetniji rez je rezultat korištenja tehnologije povećanog sužavanja luka, odnosno povećanja gustoće energije električnog luka. Manje brzine se primjenjuju zbog ostvarenja preciznijih pomaka kod rezanja. Plazmeni luk stvoren ovom tehnologijom omogućava izrazito kvalitetan vertikalni rez kod limova debljine od 0,5 do 25 mm. Slika 20. prikazuje postupak plazma rezanja s povećanim suženjem plazmenog luka. [4]



Slika 20. Rezanje plazmom s povećanim suženjem plazmenog luka [4]

### 3. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio završnog rada proveden je u Karlovcu u tvrtki General Electric. U okviru mogućnosti cilj eksperimentalnog dijela završnog rada bio je izvršiti analizu utjecaja parametara obrade na kvalitetu reza za nehrđajući čelik.

#### 3.1. Oprema za rezanje

Tip sustava za rezanje plazmom na kojem je izvršeno rezanje prikazano je slikom 21., a takav sustav za rezanje koristi tvrtka General Electric. Proizvođač stroja je Eckert, a model sustava je Onyx.



Slika 21. Prikaz CNC sustava za rezanje plazmom [14]

Model Onyx je portalne konstrukcije. Konstrukcija je izrađena od zatvorenih profila s velikim poprečnim presjecima. Posmični prigoni pogonjeni su sinkronim servo motorima. Slika 22. prikazuje vodilice rezne glave. Z os glave je opremljena senzorom za automatsko održavanje udaljenosti između sapnice i radnog komda. Maksimalna brzina pozicioniranja radne glave je 25 m/min.



Slika 22. Vodilice rezne glave [14]

Dimenzije radnog stola na kojem je izvršeno rezanje su 4000x8000 mm. Stol je izveden kao osnova na koju se postavlja okvir s izmjenjivim rešetkama. U sklopu stroja nalazi se i filterska jedinica koja je spojena na radni stol. Takav stol omogućuje učinkovito uklanjanje nečistoća prilikom procesa rezanja. Upravljački sustav stroja automatski određuje brzinu rezanja i udaljenost sapnice od radnog komada prema debljini i vrsti materijala za rezanje. [14]

Za rezanje plazmom koristi se regulacijski sustav Hyperformance Plasma HPR400XD proizvođača Hypertherm (Slika 23.). Regulacijski sustav omogućava rezanje čelika do debljine 80 mm. Iznimna kvaliteta reza postiže se kod rezanja nehrđajućeg čelika debljine od 3 do 6 mm. Tehnički plinovi koji se koriste su: kisik, dušik, vodik, argon, zrak i njihove mješavine. Primjenom navedenih plinova ostvaruje se odgovarajuća kvaliteta reza kod svih vrsta metala. Tablica 2. prikazuje tehničke podatke izvora za rezanje plazmom HPR400XD. [15]





Slika 23. Izvor za rezanje plazmom [15]

Tablica 2. Tehnički podaci izvora za rezanje plazmom [15]

Tehnički podaci	Hyperformance Plasma HPR400XD
Nazivna snaga	90,6 kVA
Napajanje	3~50/60 Hz, 400 V
Raspon struje rezanja	30 – 400 A
Napon praznog hoda	200 V
Tlak plina	8 bar
Hlađenje	Zrak
Dimenzije DxŠxV	1180x880x1260 mm
Masa	851 kg

### 3.2. Radni materijal

U eksperimentu je korišten nehrđajući čelik koji po svojoj mikrostrukturi pripada grupi austenitnih čelika. Austenitni nehrđajući čelici na prvom su mjestu po ukupnoj proizvodnji i po broju različitih vrsta.[16] Obuhvaćaju veliki dio primjene u industriji. Austenitni čelici zbog svoje dobre korozijske postojanosti, izvrsne zavarljivosti, mehaničkih svojstava te estetskih karakteristika najčešće su korištena vrsta nehrđajućih čelika. Jedan od nedostataka austenitnih čelika je niska vrijednost granice razvlačenja. Primjenjuju se u uvjetima kad se traži dobra postojanost na koroziju pri atmosferskim uvjetima i povišenim temperaturama. Legiraju se elementima koji osiguravaju formiranje austenitne mikrostrukture: niklom, dušikom i bakrom. Ugljik, iako nije legirni element također promiče austenitnu mikrostrukturu, a dodaje se jer povišuje otpornost na puzanje. [16, 17]

Neka od svojstava austenitnih čelika [17]:

- nisu magnetični
- dobro oblikovljivi u hladnom stanju
- mogu očvrsnuti samo hladnom deformacijom
- vrlo dobra žilavost na vrlo niskim temperaturama
- visoka otpornost na puzanje na visokim temperaturama

Tablica 3. Kemijski sastav nehrđajućeg čelika X5CrNiMo17-12-2 [16]

Oznaka	Kemijski sastav, [%]								
X5CrNiMo17-12-2	C	Cr	Ni	Mn	P	S	Si	Mo	Ostali
	0,07	16,5-18,5	10-13	2	0,045	0,015	1	2-2,5	0,11

Tablica 4. Mehanička svojstva nehrđajućeg čelika X5CrNiMo17-12-2 [18]

Oznaka	R <sub>m</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>p0,2</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	A [%]	KV [J]	Z [%]	Tvrdoća [HB]
X5CrNiMo17-12-2	510 – 710	205	30 – 45	100	60 – 65	200



### 3.3. Plan pokusa

U cilju određivanja kvalitete rezanja za odabrani radni materijal i debljine istog, odlučeno je da će se varirati parametri u okviru mogućnosti sustava. Za svaku debljinu materijala pokus je ponovljen dva puta. Parametri procesa kojima se variralo su jakost struje te vrsta plina odnosno plinske mješavine i zaštitnog plina. Sustav je automatski određivao brzinu rezanja i udaljenost sapnice od radnog materijala. U pokusu je korištena debljina materijala 8 mm (tablica 5.) i debljina materijala 20 mm (tablici 6.).

Tablica 5. Parametri rezanja čelika debljine 8 mm

Broj pokusa	Materijal	Jakost struje [A]	Plazmeni/zaštitni plin	Posmična brzina [m/min]	Udaljenost sapnice od radnog komada [mm]
1.	Nehrđajući čelik 8 mm	130	H35N <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	1,5	3
2.		200		2	4
3.		260		3	4
4.		130	N <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	1,6	3
5.		200		3	3,8
6.		260		-	-
7.		130	H35*/N <sub>2</sub>	1,1	3
8.		200		1,8	4
9.		260		2	4

\*H35 – mješavina vodika i argona u omjeru 35% vodika i 65% argona

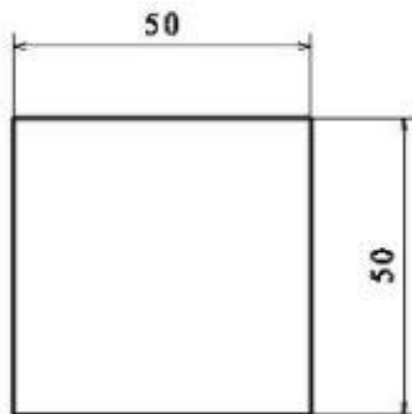
Tablica 6. Parametri rezanja čelika debljine 20 mm

Broj pokusa	Materijal	Jakost struje [A]	Plazmeni/zaštitni plin	Posmična brzina [m/min]	Udaljenost sapnice od radnog komada [mm]
1.	Nehrđajući čelik <b>20 mm</b>	130	H35N <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	0,3	4,3
2.		200		1	5,1
3.		260		1,3	4
4.		400		1,8	4,6
5.		130	N <sub>2</sub> /Zrak	-	-
6.		200		-	-
7.		260		1,6	3,8
8.		400		2,3	4,6
9.		130	H35/N <sub>2</sub>	0,36	4,5
10.		200		0,82	7,5
11.		260		1,085	7,5
12.		400		1,1	9

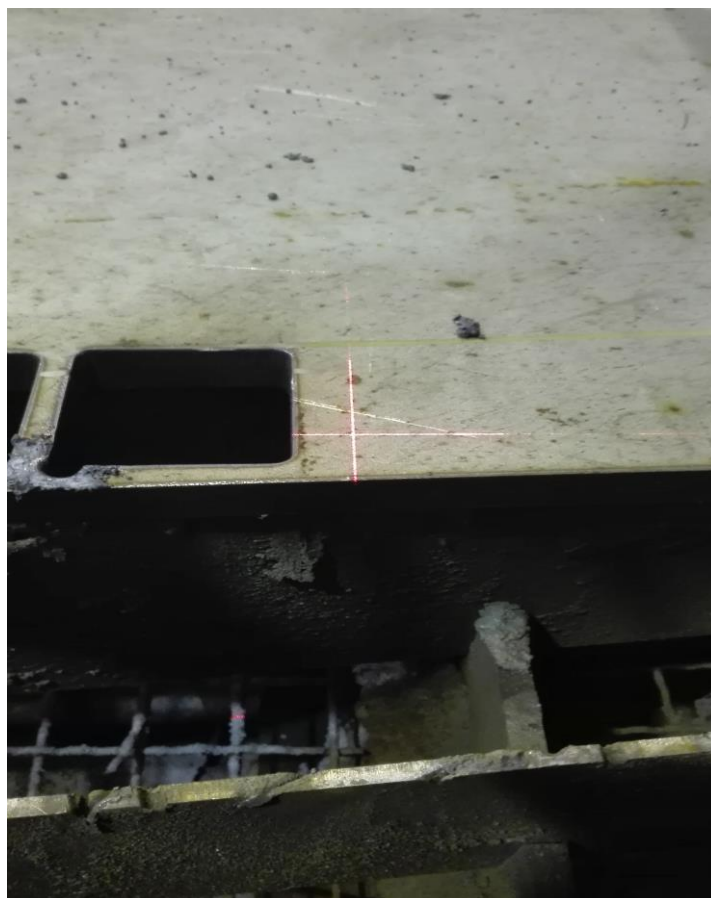
Na praznim mjestima u gore navedenim tablicama rezanje nije izvršeno jer sustav nije dopuštao rezanje pri zadanim parametrima.

### 3.3.1. Rezanje nehrđajućeg čelika plazmom

Zadani geometrijski oblik za rezanje je kvadrat 50x50 mm prikazan na slici 24., a slika 25. prikazuje pozicioniranje rezne glave u nultočku obratka odnosno poziciju za početak rezanja.



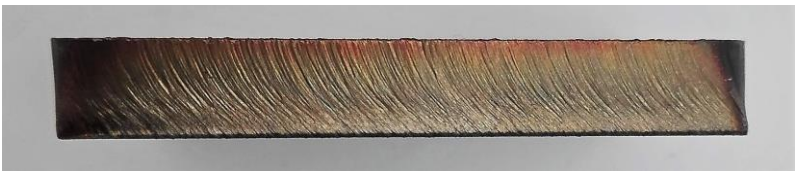


Slika 24. Geometrijski oblik za rezanje



Slika 25. Pozicioniranje rezne glave u početni položaj za rezanje




Prilikom rezanja čelika plazmom svim jakostima struje i primjenom plinova navedenih u tablici 5 i tablici 6., došlo je do potpunog rezanja čelika. Kvaliteta reza uvelike je ovisila o iznosu jakosti struje, a ujedno i o posmičnoj brzini te o primjeni različitih plinova. Dobiveni rezultati prikazani su tablicama. Tablice sadrže izgled površine reza svih uzoraka pri određenim parametrima. Analizom kvalitete površine reza izvršit će se njihova klasifikacija.

Tablica 7. Izgled površina reza pri jakosti struje 130 A (8 mm)

Smjer rezanja			←
Uzorak	v [m/min]	Plin	Struja rezanja – 130 A, tlak plina – 8 bar, debljina materijala – 8 mm
1.	1,5	H35N <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	
4.	1,6	N <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	
7.	1,1	H35/N <sub>2</sub>	


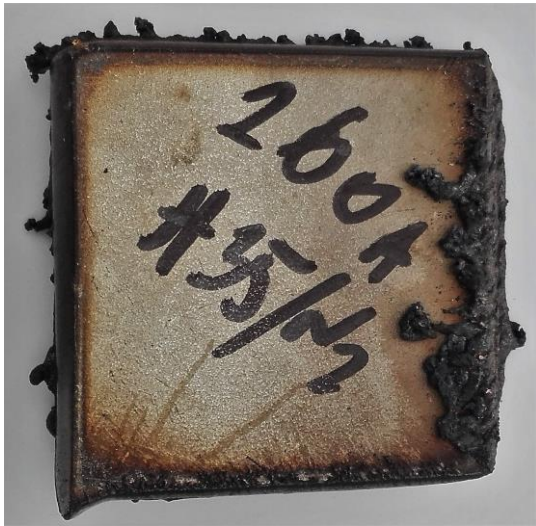
U tablici 7. prikazane su površine reza nehrđajućeg čelika debljine 8 mm. Iznos jakosti struje je određen i iznosi 130 A. Tlak plina je također konstantan i iznosi 8 bara. Svaki od uzoraka odrezan je različitim plinom odnosno plinskim mješavinama. Na posmičnu brzinu se nije moglo utjecati, već je sustav automatski određivao brzinu ovisno o jakosti struje i korištenom plinu. Najlošija kvaliteta reza ostvarena je rezanjem dušikom kao plazmenim i zaštitnim plinom. Površina reza je ostala crna te se na donjem rubu reza stvorio srh, dok kod rezanja plinskim mješavinama argona i vodika te argona, vodika i dušika nije došlo do stvaranja srha. S druge strane, nepravilnost usmjerenosti reznih linija suprotno od smjera rezanja je znatno izraženija pri manjim iznosima jakosti struje što je vidljivo na sva tri uzorka.

Tablica 8. Izgled površina reza pri jakosti struje 200 A (8 mm)

Smjer rezanja			←
Uzorak	v [m/min]	Plin	Struja rezanja – 200 A, tlak plina – 8 bar, debljina materijala – 8 mm
2.	2	H35N <sub>2</sub> / N <sub>2</sub>	
5.	3	N <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	
8.	1,8	H35/N <sub>2</sub>	

U tablici iznad iznos jakosti struje se povećao na 200 A, a time i brzina. Plinske mješavine kojima se rezalo i zaštni plinovi ostali su isti kao u prethodnoj tablici. Povećanje posmične brzine uzrokovalo je stvaranje troske na donjem reznom rubu svih uzoraka u većim ili manjim količinama. Na uzorku 5. vidljivo je veće dimenzijsko odstupanje od zadanog geometrijskog oblika te izraženiji konus. Najbolja kvaliteta reza je na uzorku 2 primjenom plinske mješavine argona, vodika i dušika kao plazmenog plina i dušika kao zaštitnog plina. Najlošija kvaliteta reza ponovno je vidljiva uzorku 5 kod rezanja plazmom s dušikom kao jedinim plazmenim plinom. Iz toga se može zaključiti da korištenje dušika za rezanje nije pogodno već na debljini 8 mm.



Tablica 9. Izgled površina reza pri jakosti struje 260 A (8 mm)

Smjer rezanja			←
Uzorak	v [m/min]	Plin	Struja rezanja – 260 A, tlak plina – 8 bar, debljina materijala – 8 mm
3.	3	H35N <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	
6.	-	N <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	-
9.	2	H35/N <sub>2</sub>	

Nadalje, tablica 9. prikazuje površine reza izrezanih uzoraka pri iznosu jakosti struje od 260 A. Rezanje dušikom nije odrađeno jer sustav nije dopuštao rezanje dušikom kao plazmenim plinom pri tom iznosu jakosti struje. Površina reza nije prikazana za uzorak 9 jer je u potpunosti rastaljen i gornji i donji rezni rub, a uzrok toga je prevelik iznos jakosti struje. Udaljenost sapnice pri rezanju oba uzorka je bila na 4 mm. Nakon analize svih uzoraka debljine 8 mm može se zaključiti kako je rezanje plinskom mješavinom argona, vodika i dušika najpogodnije za rezanje nehrđajućeg čelika. Kod svih uzoraka rezanih tom plinskom mješavinom kvaliteta reza je zadovoljavajuća, iako postoji malo dimenzijsko odstupanje i kod tih uzoraka. Također, rezanje nehrđajućeg čelika debljine 8 mm kvalitetnije je pri manjim iznosima jakosti struje i manjim brzinama.





Tablica 10. Izgled površina reza pri jakosti struje 130 A (20 mm)

Smjer rezanja			←
Uzorak	v [m/min]	Plin	Struja rezanja – 130 A, tlak plina – 8 bar, debljina materijala – 20 mm
1.	0,305	H35N <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	
5.	-	N <sub>2</sub> /Zrak	-
9.	0,36	H35/N <sub>2</sub>	

U tablici 10. prikazane su površine reza nehrđajućeg čelika debljine 20 mm. Plinovi korišteni za rezanje plazmom su argon, vodik i dušik, a zaštitni plinovi su dušik i zrak. Zrak se koristio kao zaštitni plin kod rezanja s dušikom. Iznos jakosti struje je 130 A i tlak plina 8 bara. Brzine koje sustav automatski određuje su manje u usporedbi s brzinama kod debljine 8 mm pri iznosu jakosti struje 130 A. Rezanje dušikom kao plazmenim plinom nije bilo omogućeno zbog premalog iznosa jakosti struje i ne bi došlo do rezanja uzorka. Na izrezanim uzorcima stvorila se troska na donjem reznom rubu i rastalio se gornji rezni rub. To je posljedica premale brzine odnosno premalog iznosa jakosti struje. Kvaliteta reza na oba uzorka nije zadovoljavajuća, dimenzijski odstupaju od zadanih dimenzija i rubovi su zaobljeni. Također je vidljivo iz slika uzoraka da su dobivene površine reza izrazito hrapave.

Povećanjem iznosa jakosti struje na 200 A kvaliteta reza je bolja, no i dalje postoje dimenzijska odstupanja te su rubovi zaobljeni. Količina srha na donjem reznom rubu se izrazito smanjio ili ga uopće nema. Pri jakosti struje od 200 A i dalje nije bilo moguće ostvariti rezanje dušikom kao plazmenim plinom. Kvaliteta reza (uzorak 2) kod rezanja plinskom mješavinom argona, vodika i dušika se izrazito povećala što je vidljivo u tablici 11. Brzina je nešto veća kod uzorka 2 zbog korištenja navedene plinske mješavine. Dodavanjem dušika plinskoj mješavini argona i vodika postižu se veće posmične brzine.

Tablica 11. Izgled površina reza pri jakosti struje 200 A (20 mm)

Smjer rezanja			→
Uzorak	v [m/min]	Plin	Struja rezanja – 200 A, tlak plina – 8 bar, debljina materijala – 20 mm
2.	1	H35N <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	
6.	-	N <sub>2</sub> /Zrak	Sustav nije dopuštao rezanje tim parametrima
10.	0,82	H35/N <sub>2</sub>	



Tablica 12. Izgled površina reza pri jakosti struje 260 A (20 mm)

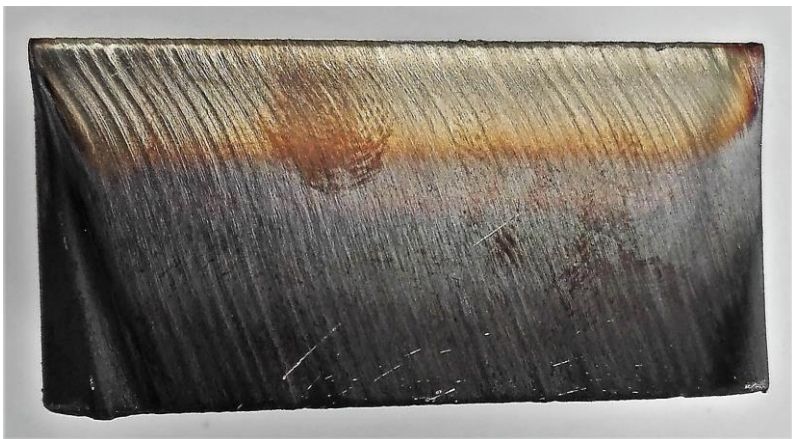


Smjer rezanja			→
Uzorak	v [m/min]	Plin	Struja rezanja – 260 A, tlak plina – 8 bar, debljina materijala – 20 mm
3.	1,3	H35N <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	
7.	1,6	N <sub>2</sub> /Zrak	
11.	1,085	H35/N <sub>2</sub>	

U tablici 12. prikazani su izrezani uzorci pri iznosu jakosti struje od 260 A. Omogućeno je rezanje plazmom s dušikom i zaštitnim plinom zrakom. Posmična brzina kod tog načina je veća u odnosu na druga dva uzorka. Površina reza je hrapava zbog velikog broja reznih linija te nije zadovoljavajuća kvaliteta reza. Povećanjem jakosti struje rezne linije idu u smjeru rezanja što je pogodno. Na mjestu početka rezanja to jest na mjestu probijanja materijala došlo je do taljenja gornjeg ruba. Zadovoljavajuća kvaliteta površine reza je na uzorku 3 i 11.

Udaljenost sapnice od radnog komada je veća prilikom rezanja nehrđajućeg čelika debljine 20 mm jer se tali veća količina materijala koja može oštetiti sapnicu ako bi bila bliže radnom komadu. Uzorci prikazani u tablici 13. rezani su pri iznosu jakosti struje od 400 A, a to je najveća jakost struje koju sustav može ostvariti. Izrazito loša kvaliteta reza ostvarena je korištenjem plinske mješavine argona i vodika. Brzina je 1,1 m/min što je premalo pri jakosti struje od 400 A pa dolazi do stvaranja srha na donjem reznom rubu. Deformacija uzorka je izrazito velika zbog velikog utjecaja topline na komad.

Iz svega navedenog i prikazanog u tablicama, može se zaključiti da rezanje dušikom kao jedinim plazmenim plinom daje izrazito lošu kvalitetu reza. Apsorpcija dušika na površini reza ima nepovoljan učinak na mogućnost zavarivanja, hrapavost površine je velika i prisutna su velika dimenzijska odstupanja i zaobljeni rubovi. Dušik se koristi za rezanje nehrđajućeg čelika, ali samo tankih limova, što se utvrdilo ovim pokusom. Sam sustav nije omogućavao rezanje dušikom prema planu pokusa. Najbolja kvaliteta reza ostvarena kod rezanja nehrđajućeg čelika je plinskom mješavinom argona, vodika i dušika te dušikom kao zaštitnim plinom. Svi izrezani uzorci debljine 8 mm su zadovoljavajuće kvalitete, dok kod debljine 20 mm postoje razlike pri različitim iznosima jakosti struje. Pokusom je ustanovljeno da uzorke debljine 20 mm nije poželjno rezati malim iznosima jakosti struje jer je kvaliteta reza i sam izgled uzoraka ne zadovoljavajuć.

Tablica 13. Izgled površina reza pri jakosti struje 400 A (20 mm)

Smjer rezanja			→
Uzorak	v [m/min]	Plin	Struja rezanja – 400 A, tlak plina – 8 bar, debljina materijala – 20 mm
4.	1,8	H35N <sub>2</sub> /N <sub>2</sub>	
8.	2,3	N <sub>2</sub> /Zrak	
12.	1,1	H35/N <sub>2</sub>	

## 4. ZAKLJUČAK

Rezanje plazmom jedan je od najčešće korištenih postupaka za rezanje različitih vrsta metala. U teoretskom dijelu opisan je proces rezanja plazmom te utjecaj glavnih parametara na kvalitetu reza. Eksperimentalni dio rada proveden je u tvrtki General Electric. Rezanje je izvršeno u okviru mogućnosti upravljačkog sustava koji koristi tvrtka. Tvrtka koristi stroj Eckert Onyx na kojem su rezani uzorci dimenzija 50x50 mm. Materijal za rezanje je bio nehrđajući čelik debljina 8 i 20 mm. Nakon provedenog rezanja izvršena je analiza uzoraka te klasifikacija prema izgledu površina rezova. Promatran je utjecaj plazmenih plinova, iznos jakosti struja i posmičnih brzina na kvalitetu površine reza.

Svi uzorci su izrezani prema planu pokusa. Iz izvedenog plana pokusa moguće je izvesti nekoliko zaključaka. Prije svega se može zaključiti da korištenje dušika kao jedinog plazmenog plina nije pogodno za rezanje nehrđajućeg čelika većih debljina jer se dobiva hrapava površina reza i odstupanja od zadanih dimenzija su velika. Debljine čelika od 8 mm nije bilo moguće rezati dušikom pri iznosima jakosti struje većim od 200 A, a kod čelika debljine 20 mm pri iznosima struje manjim od 200 A. Dušik kao plazmeni plin bolje je koristiti za rezanje tanjih limova. Najbolja kvaliteta reza ostvarena je korištenjem plinske mješavine argona, vodika i dušika. Kvaliteta reza čelika debljine 8 mm je zadovoljavajuća kod svih uzoraka, dok debljine 20 mm to nije slučaj. Gledajući sveukupno kod svih uzoraka izrezanih tom plinskom mješavinom, rez je ostvaren s najmanje srha, dimenzijska odstupanja su mala te zaobljenost bridova je najmanje izražena. Također, hrapavost površine je najmanje izražena na uzorcima izrezanih s navedenom plinskom mješavinom.

Zaključak je da iznos jakosti struje i posmična brzina imaju izuzetno velik utjecaj na kvalitetu reza. Isto tako, eksperimentalnim dijelom se pokazalo kako primjena različitih plinova i mješavina ima velik utjecaj na kvalitetu reza. Primjenom plinskih mješavina ostvareni su bolji rezultati to jest postignuta je bolja kvaliteta reza. Iako se rezanjem materijala plazmom mogu dobiti izratci visoke kvalitete i dimenzijske točnosti, poželjna je naknadna obrada izratka.

## LITERATURA

- [1] J. A. Bittencourt: Fundamentals of Plasma Physics, Third Edition
- [2] Plasma Arc Cutting,  
[http://local.college.ie/Content/APPRENTICE/liu/pipefitting/pdf/M2\\_U7\\_Plasma%20Arc%20cutting.pdf](http://local.college.ie/Content/APPRENTICE/liu/pipefitting/pdf/M2_U7_Plasma%20Arc%20cutting.pdf)
- [3] I. Samardžić: Rezanje plazmom – podloge za predavanja, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu.
- [4] Facts about plasma technology and plasma cutting,  
[http://www.boc-gas.co.nz/internet.lg.lg.nzl/en/images/BOC%20Facts%20about%20plasma%20technology435\\_68107.pdf?v=1.0](http://www.boc-gas.co.nz/internet.lg.lg.nzl/en/images/BOC%20Facts%20about%20plasma%20technology435_68107.pdf?v=1.0)
- [5] How a Plasma Cutters Works,  
<http://www.lincolnelectric.com/en-us/equipment/plasma-cutters/process-and-theory/Pages/how-a-plasma-cutter-works.aspx>
- [6] Improvements to CNC plasma technology, The Fabricator, 2007,  
<https://www.thefabricator.com/article/plasmacutting/improvements-to-cnc-plasma-technology>
- [7] Improving plasma cut quality, The Fabricator, 2007,  
<https://www.thefabricator.com/article/plasmacutting/improving-plasma-cut-quality>
- [8] Putting together a plasma cutting system, The Fabricator, 2015,  
<https://www.thefabricator.com/article/plasmacutting/putting-together-a-plasma-cutting-system>
- [9] Starting from scratch, The Fabricator, 2006,  
<https://www.thefabricator.com/article/plasmacutting/starting-from-scratch>
- [10] [https://slidemy.com/download/plasma-arc-cutting\\_58fb2e0bdc0d605c61959ead\\_pdf](https://slidemy.com/download/plasma-arc-cutting_58fb2e0bdc0d605c61959ead_pdf)
- [11] <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/tech-tips-for-better-plasma-cutting>
- [12] B. Bauer: podloge za tečaj EWE – Rezanje plazmom, FSB, Zagreb.
- [13] <http://www.kjellberg.de/Cutting-Equipment/Plasma/Plasma-cutting/Used-gases/Gas-properties.html>
- [14] <https://www.eckert.com.pl/en/offer/machines/603,onyx.html#description>

- [15] <https://www.hypertherm.com/hypertherm/hyperformance/hyperformance-hpr400xd/>
- [16] [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1507033229-0-nehrajui\\_elici.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1507033229-0-nehrajui_elici.pdf)
- [17] [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1385548905-0-i\\_predavanje\\_13.pdf](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1385548905-0-i_predavanje_13.pdf)
- [18] [http://www.steelnumber.com/en/steel\\_composition\\_eu.php?name\\_id=106](http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=106)

## **PRILOZI**

### **I. CD-R disc**